

**А. Е. ПРОВОЛОЦКИЙ**, д-р техн. наук,  
**П. С. ЛАПШИН**, Днепропетровск, Украина

## **ШАРОВЫЕ ПОЛИМЕРЫ В ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

У статті приведені результати досліджень струмінної обробки та використання кульових полімерних матеріалів, які накопичують електростатичні заряди. При контакті куль з оброблюваною поверхнею вони утворюють необхідний мікрорельєф.

В статье приведенные результаты исследований струйной обработки и использование пулевых полимерных материалов, которые накапливают электростатические заряды. При контакте шаров с обрабатываемой поверхностью они образуют необходимый микрорельеф.

In the article the resulted results of researches of jetting treatment and uses of bullet polymeric materials, which accumulate electrostatic charges. At the contact of bullets with the processed surface they form necessary microrelief.

*Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.*

В реализации поставленных задач решающая роль принадлежит применению прогрессивных технологий, к которым относится и технология чистовой обработки деталей машин с использованием эффекта ударно-импульсного действия на поверхность потока свободного абразива. Этот эффект используется при разработке разнообразных схем струйно-абразивной обработки.

Струйно-абразивная обработка находит широкое применение при очистке заготовок от окалины, чистовой доводке деталей, в том числе и сложной формы. При этом значительно сокращается трудоемкость технологических процессов, и повышаются эксплуатационные показатели обработанных поверхностей.

Особое строение микрорельефа поверхностей, обработанных потоком свободного абразива, позволяет рекомендовать струйно-абразивную обработку для поверхностей пар трения, пресс-форм и штампов, заготовок перед нанесением различных видов покрытий, прокатного инструмента и оснастки.

Технологические параметры выбираются с учетом физических свойств и исходной шероховатости обрабатываемых поверхностей, при этом учитываются эксплуатационные показатели применяемых суспензий.

Важным фактором является выбор абразивного материала. При всех положительных показателях струйной абразивной обработке имеется отрицательный фактор разрушения абразивных частиц при их соударении с обрабатываемой поверхностью, это приводит к снижению производительности обработки и недостаточное снижение шероховатости детали. Многие указанные отрицательные факторы были исследованы и изложены в монографиях [1], но не было исследования использования абразивных частиц, которые могли бы накапливать электростатические заряды, а после разрядов вели обработку с получением микрорельефа.

*Постановка задачи нового исследования.* Провести поиск и исследования шаровых полимерных частиц, которые могли бы заменить такие дорогостоящие абразивные материалы как алмаз, карбид кремния, электрокорунды и другие.

Полимерные материалы используются в промышленности, в основном, для производства различных изделий химической промышленности. Известно, что при переработке и эксплуатации изделий из полимерных материалов огромное значение уделяется устранению электростатических зарядов, являющихся причиной брака продукции, резкого снижения скорости работы машин и аппаратов. Кроме того, искровые разряды статического электричества могут вызывать взрывы и воспламенение горючих жидкостей, огнеопасных газовых смесей, пыли. Электризация полимерных материалов приводит к сильному загрязнению их поверхности и может также увеличивать скорость деструкции полимеров, сопровождающуюся выделением токсичных веществ. Поэтому применение полимерных материалов в качестве наполнителей струи при струйной обработке ограничено, а там где все же применяют обработку в таком виде, обязательно используют устройства для снятия статического заряда.

Электростатические заряды возникают в полимерах при их трении или разрыве контакта как с проводящими материалами, так и с диэлектриками. Хорошая статическая электризация полимеров является следствием их высоких диэлектрических свойств. Важнейшей характеристикой электризации полимеров является среднеквадратичный полупериод утечки электростатического заряда ( $T_{mrs}$ ), который измеряется в секундах. Считается, что материал плохо электризуется при  $<10$  сек., т.е. имеет высокие антистатические свойства. При температуре  $21^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха 65% некоторые полимер имеют значения  $T_{mrs}$  приведенные в таблице 1

Таблица 1 – Значения  $T_{mrs}$  некоторых полимеров, сек.

Поли-N-винилимидазол.	0,19
Поливинилпентаметилфосфорамид	0,2
Полистиролосульфонат натрия	0,30
Полидиметилакриламид	0,58
Полиакриловая кислота	1,30
Полиэтиленсульфонат натрия	2,00
Полиакриламид	3,46
Поливинилфторид	8,40
Поливиниловый спирт	1389,00
Полистирол, поливинилхлорид	8000,00

Из представленной таблицы можно сделать вывод, что полистирол, поливинилхлорид и их производные имеют большое время релаксации гомозаряда. Применительно к рассматриваемому процессу это означает что заряды, приобретенные отдельной сферой в элементарных актах механического взаимодействия с другими сферами и стенками эжекционного шланга и сопла, будут спадать очень медленно и поэтому будут суммироваться. Рост заряда на сферах происходит до достижения критической напряженности электрического поля, при которой происходит пробой окружающего воздуха.

Другой характеристикой электризации полимеров является объемное электрическое сопротивление ( $P_v$ ). Практически не электризуются материалы, у которых  $P_v$  не превышает  $10^8$  Ом•м. Полимерные же материалы имеют более высокое значение  $P_v$  находящееся для различных полимеров в диапазоне  $10^{10}$ – $10^{16}$  Ом • м.

Проводились исследования возможностей применения сополимеров стирола, характеризующихся по сравнению с полистиролом лучшими механическими и диэлектрическими свойствами.

Причина увеличения ударной прочности сополимеров заключается во введении сшивающего агента, которым в данном случае является дивинилбензол. По одной из существующих гипотез, частицы микрогеля способны снижать концентрацию напряжений, возникающих на конце трещины, растущей под действием ударной нагрузки. Сравнивая, ударопрочный полистирол с выбранными сополимерами стирола обнаруживаем, что последние имеют ударную прочность большую в среднем на 65% и меньшее относительное удлинение в среднем на 25%. Эти данные подтверждаются экспериментально. Стойкость сополимеров к разрушению значительно выше, чем у полистирола, что позволяет использовать их многократно, тем самым снижая расходы, связанных с

закупкой материала для обработки. Диэлектрические свойства сополимеров стирола значительно лучше, чем у полистирола. Удельное объемное электросопротивление составляет  $10^{16}$  против  $10^{14}$  Ом•м у полистирола, а тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1МГц – 0,0004 против 0,0007, что позволяет утверждать о большей электризации сополимеров стирола.

Таким образом, в дальнейших исследованиях в качестве наполнителя струи использовались сополимеры стирола, у которых хорошие механические свойства сочетаются с лучшими, из всех полимеров диэлектрическими свойствами.

Особую актуальность приобретает применение струйной обработки для снятия старых лакокрасочных покрытий, а также для подготовки поверхности к нанесению новых покрытий. Применение струйной обработки с полимерными наполнителями струи (сопровождающееся электрофизическими эффектами) позволяет получать наилучшее качество поверхности перед окраской, соответствующее высочайшим стандартам [2].

При использовании эжекционного способа подачи абразивного материала диэлектрические гранулы, например, полистирола, двигаясь по шлангу, входят в контакт с его внутренними стенками. В результате трения гранул о стенки резинового шланга и между собой, гранулы заряжаются электрическим зарядом.

Двигаясь по каналам струйного аппарата, часть зарядов гранулы отдают металлическим поверхностям аппарата.

Так как аппарат не связан с основной массой установки и землей, то заряды деталям аппарата будут передаваться до насыщения, а затем потеря зарядов прекратится. Заряженные частицы, выходя из струйного аппарата, направляются на обрабатываемую поверхность. При соударении заряженных частиц с обрабатываемой поверхностью появляются искровые заряды. При искровых разрядах поверхностный слой детали подвергается интенсивной эрозии. В месте образования единичного искрового разряда на поверхности детали остается эрозионная лунка. К электрической эрозии добавляется удар частиц, и интенсивность разрушения еще более увеличивается, а шероховатость поверхности за счет ударов гранул уменьшается.

Таким образом, имеет место комбинированный способ обработки: поверхностный слой заготовки одновременно разрушается за счет искрового разряда и удара твердой частицы. При обработке особо твердых заготовок струйная обработка абразивными частицами практически не

осуществляется из-за дробления частиц, тогда как при обработке заряженными частицами процесс электрической эрозии сопровождается нагревом микрообъемов металла, причем тех, которые будут подвергнуты последующему ударному воздействию частиц. Поэтому, преобладающим видом разрушения является электростатическая эрозия. Разрушение материала за счет ударного воздействия полимерных частиц невелико и несоизмеримо с электроискровым износом.

В некоторых случаях наблюдается такой недостаток как возникновение в поверхностном слое напряжений растяжения. Частицы сополимеров стирола могут накапливать значительные заряды (сотни и даже тысячи вольт). При разряде возникают эрозионные эффекты с появлением глубоких лунок, т.е. шероховатость поверхности резко ухудшается. При обработке тонкой фольги искровые разряды прожигают заготовку насквозь.

Нагретые микрообъемы легче деформируются при ударном воздействии частиц, т.е. электрической эрозии подвергаются тела любой твердости.

Электрическая природа процесса разрушения подтверждается как электрическими разрядами, наблюдающимися в рабочей камере и зарядением обрабатываемых деталей, так и морфологией обработанной металлической поверхности, типичной для электроискровой обработки, а также тем обстоятельством, что твердость используемых полимеров намного меньше твердости металла на котором при обработке возникают эрозионные лунки.

Электрический разряд в твердых, жидких и газообразных диэлектриках (пробой) наступает при некоторой присущей данному материалу напряженности электрического поля в результате ударной ионизации атомов (молекул) диэлектрика электронами, что приводит к образованию электронных лавин, а затем к быстрому прорастанию стримера – канала, в котором вещество сильно ионизировано. Различают три основные фермы пробоя:

1. Электрический пробой, который обусловлен чисто электрическими процессами (лавинообразное нарастание носителей заряда вследствие ионизации электронным ударом) и развивается за сравнительно короткий промежуток времени  $10^{-5} - 10^{-9}$  с.

2. Тепловой пробой – возникает на фоне резкого роста тепловыделения в диэлектрике за счет диэлектрических потерь и роста электропроводности.

3. Электрохимический пробой (электрическое старение) – развивается в течение длительного промежутка времени при неизменном поле с напряженностью ниже электрической прочности материала на фоне изменения химического состава и структуры диэлектрика. Примером может служить прораствание дендритовидных проводящих каналов – водных триингов. Образующееся в месте пробоя отверстие, которое зачастую имеет ветвистое строение, называется каналом разряда. Канал разряда не всегда бывает сквозным. При неполном пробое он не имеет выходного отверстия.

Проведенные в проекте измерения тока утечки при обработке металлической поверхности струей полимерных сфер (металлическая пластина была заземлена через наноамперметр) показывают, что этот ток весьма мал –  $10^{-7}$ –  $10^{-8}$  А. Таким образом имеет место самоограничение интегрального разрядного тока. Разумно предположить, что при столь малых токах во внешней цепи, в покрытии развивается чисто электрическая форма пробоя.

Анализ литературы и экспериментальных данных показывает, что электрическое зарядение полимерных диэлектриков (изоляторов), без приложения внешнего электрического поля в результате механических воздействий, может происходить вследствие следующих явлений:

1. Трибоэлектрический эффект, возникающий при трении диэлектрика по диэлектрику и по металлу (проводнику). В основе трибоэлектрического эффекта лежит переход электронов от материала с меньшей к материалу с большей работой выхода электрона при их контакте. Механическое трение способствует увеличению эффективной площади контакта и позволяет наблюдать электрическое зарядение при взаимном трении тел, состоящих из одного материала, так как трущиеся тела будут, как правило, иметь разные температуры в области контакта и электроны будут переходить от более нагретого к менее нагретому телу.

2. Зарядение твердых тел при их деформации. Экспериментально доказано, что зарядение полимеров при деформации зависит от их физического состояния – они заряжаются, если находятся в стеклообразном состоянии и не заряжаются, если находятся в высокоэластичном состоянии.

В связи с этим зарядение полимерных сфер происходит, по-видимому, как в результате трибоэлектрического эффекта, так и в результате их деформации в момент удара по обрабатываемой детали. В трибозарядении имеет смысл выделить три компонента:

а) заряджение в результате трения сфер об эжекционный шланг, изготовленный из диэлектрика – резины;

б) заряджение в результате трения сфер о выходное сопло, изготовленное из проводника – стали;

в) заряджение в результате трения друг о друга сфер, имеющих разные скорости движения.

Начальная проверка гипотез проведена на специально разработанном стенде.

Ранее выполненные исследования указывают на большое время релаксации гомозаряда и большую энергию активации этого процесса для высокоомных полимерных диэлектриков, к которым относится, судя по его диэлектрическим характеристикам, выбранный нами полимер. Применительно к рассматриваемым процессам это означает, что заряды, приобретенные отдельной сферой в элементарных актах механического взаимодействия с другими сферами и стенками шланга и сопла, будут спадать очень медленно и поэтому будут фактически суммироваться. Естественным ограничением процесса роста заряда на сферах является электрический разряд - пробой окружающего воздуха при достижении критической напряженности электрического поля, которая определяется законом Пашена.

Учитывая, что в потоке полимерных сфер до момента их подлета к обрабатываемой поверхности происходит большое число актов их взаимодействия между собой и стенками струйного аппарата, можно в первом приближении считать сферы в момент их подлета к обрабатываемой поверхности равномерно заряженными. В этом случае с приближением сферы и обрабатываемой поверхности напряженность поля ( $E$ ), создаваемого зарядом этой сферы вблизи этой поверхности, растет по закону [3]:

$$E = \frac{\sigma \cdot R^2}{\varepsilon \cdot r^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда на сфере,

$R$  – радиус сферы,

$r$  – расстояние от центра сферы до рассматриваемой точки (в данном случае до обрабатываемой поверхности),

$\varepsilon$  – электрическая постоянная.

Большой объем исследований был посвящен выбору диаметра частиц.

Для обработки диэлектрических лакокрасочных покрытий готовили абразивную массу, состоящую из сферических шариков сополимера стирола зернистостью 0,2-0,45 мм. При движении к обрабатываемой поверхности частицы сополимера стирола трутся о стенки резинового шланга и получают заряд, который зависит от соотношения между скоростью трения и величиной удельного поверхностного сопротивления [4]. Достигая поверхности заготовки частицы разряжаются, разрушая диэлектрические лакокрасочные покрытия за счет электрической эрозии. Ударное действие частиц таких размеров (0,2-0,45 мм) невелико, поэтому электрическая эрозия является основным видом разрушения.

Напряжения, возникающие при электрической эрозии имеют знак противоположный тому, который появляется при ударном воздействии шариков на обрабатываемую поверхность. При использовании шариков диаметром 0,2-0,45 мм эти напряжения уравнивают друг друга. Поэтому коробления сведены к минимальным.

Заряд в таких частицах используется полностью, т.е. за короткое время удара частица успевает, благодаря своим малым размерам, полностью разрядиться. То есть более полно используется энергия заряженных частиц. При использовании шариков сополимера стирола в диапазоне (0,2-0,45 мм) возникает напряженность электрического поля, достаточная для пробоя многослойных диэлектрических лакокрасочных покрытий, несмотря на малую мощность заряда шарика. Мощность заряда такая, что не вызывает на поверхности металла электроэрозионным лунок и не увеличивает шероховатость очищенной поверхности. При меньшем объеме шарика и, следовательно, меньшем заряде напряженность электрического поля достаточна для пробоя многослойных диэлектрических лакокрасочных покрытий, так как уменьшается радиус шарика.

При диаметре шариков сополимера стирола 0,2-0,45 мм Напряжения сжатия возникающие при механическом ударе уравниваются напряжениями растяжения в результате электрических разрядов; и заготовки не подвергаются короблению.

Характер контакта шарика сополимера стирола с обрабатываемой поверхностью, благодаря упругопластическим свойствам шарика, представляет собой небольшую площадь, размеры которой зависят от диаметра шарика и энергии механического удара. Поэтому электрический пробой многослойных диэлектрических покрытий можно рассматривать как пробой в конденсаторе, который происходит в одной точке. При этом использование шариков сополимера стирола диаметром 0,2-0,45 мм



позволяет увеличить производительность, т.к. суммарное накопление зарядов в этих шариках больше чем в шариках диаметром более 0,45 мм. А так как при меньших размерах на единице площади может поместиться больше шариков, чем при больших размерах, то возрастает и количество разрядов на единицу площади. Суммарный электрический заряд потока шариков меньшего диаметра больше [4]. Следовательно на одной и той же площади обработки применение шариков меньшего диаметра по сравнению с большими шариками вызывает более интенсивный съем диэлектрических покрытий без повреждения поверхности основного металла. При этом, экспериментально установлено, что наибольшая эффективность разрушения покрытий наблюдается при размерах частиц 0,2 мм.

При выборе частиц сополимера стирола диаметром менее 0,2 мм количество частиц в единице объема движущейся массы будет настолько большим, что частицы друг друга экранируют от контакта со стенками резинового шланга. Кроме того, экранирующий эффект проявляется при соударении с обрабатываемой поверхностью, что вызывает резкое уменьшение производительности процесса съема диэлектрических покрытий. При этом преобладающим будет разрушение диэлектрического лакокрасочного покрытия от электрической эрозии, и на металлической поверхности возникают напряжения растяжения.

Максимальный размер частиц (0,45 мм) установленный экспериментально, обусловлен тем, что частицы диаметром более 0,45 мм при соударении отдают не весь заряд из-за кратковременности соударения [4].

Очевидно, что разрушение лакокрасочного покрытия происходит в результате множественных пробоев, приводящих к потере покрытием механической прочности, с последующим механическим срывом и уносом ослабленных участков покрытия потоком сфер. Однако, не вполне ясно посредством каких именно механизмов формируются электрические поля, превышающие электрическую прочность покрытия ( $E_{np}$ ) необходимую для развития пробоя.

Как было отмечено выше, заряд, который несет на себе отдельная сфера не может превышать определенного значения, при котором возникает пробой окружающего воздуха. Электрическая прочность воздуха в однородном поле равна 3,2 МВ/м, а электрическая прочность большинства полимерных материалов, в том числе и лакокрасочных покрытий составляет десятки МВ/м. Поэтому заряд, который приносит на себе отдельная сфера при подлете к детали явно недостаточен для

формирования пробоя. В этой связи можно предположить, что реализуется один из приведенных механизмов, или их комбинация.

1. При механическом ударе сферы об обрабатываемую поверхность на ней в результате деформации возникает дополнительный заряд, величина которого в сумме с трибозарядом достаточна для создания поля с  $E > E_{np}$ .

2. Сферы при механическом ударе передают часть переносимого ими заряда гетерогенному слоистому диэлектрику, который представляет собой лакокрасочное покрытие. При накоплении заряда достаточной поверхностной плотности ( $\sigma$ ) напряженность поля ( $E$ ) достигает электрической прочности покрытия ( $E_{np}$ ) и возникает пробой:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2)$$

3. Заряженные сферы при их механическом ударе об обрабатываемую поверхность создают электрические импульсы, величина которых хоть и недостаточна для формирования пробоя, но вызывает частичные разряды в дефектных местах покрытия (например, в микропорах). Электрическое старение совместно с механическими ударами разрушает покрытие.

Для уточнения и развития количественной физической модели процесса были проведены необходимые измерения толщин, электрической прочности  $E_b$ , диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , диэлектрических потерь  $tg\sigma$  и удельного объемного сопротивления  $\rho$  различных слоев лакокрасочных покрытий используемых в авиационной промышленности. Исследованы два типа лакокрасочных покрытий. В обоих случаях лакокрасочные покрытия состоят из трех слоев: грунтовки типа АК-070, нитроэмали типа ХВ-16 или АС-131 и защитного лака типа ЛС-16. Образцы для исследований изготавливали путем нанесения слоев грунта, эмали и лака по отдельности и в обычной комбинации на алюминиевую фольгу имеющую высокую равномерность по толщине. Толщину покрытий определяли с помощью микрометра типа 1МИГ с точностью 1 мкм. Пробой производили на фронте стандартного импульса (1,25/50 мкс). Диэлектрическую проницаемость и  $tg\sigma$  определяли мостовым методом а удельное объемное сопротивление по трехэлектродной схеме при  $E=0,5$  МВ/м. При определении электрической прочности и толщины лакокрасочных покрытий ( $h$ ) для каждого материала производили в среднем по 300 замеров(рис. 1).

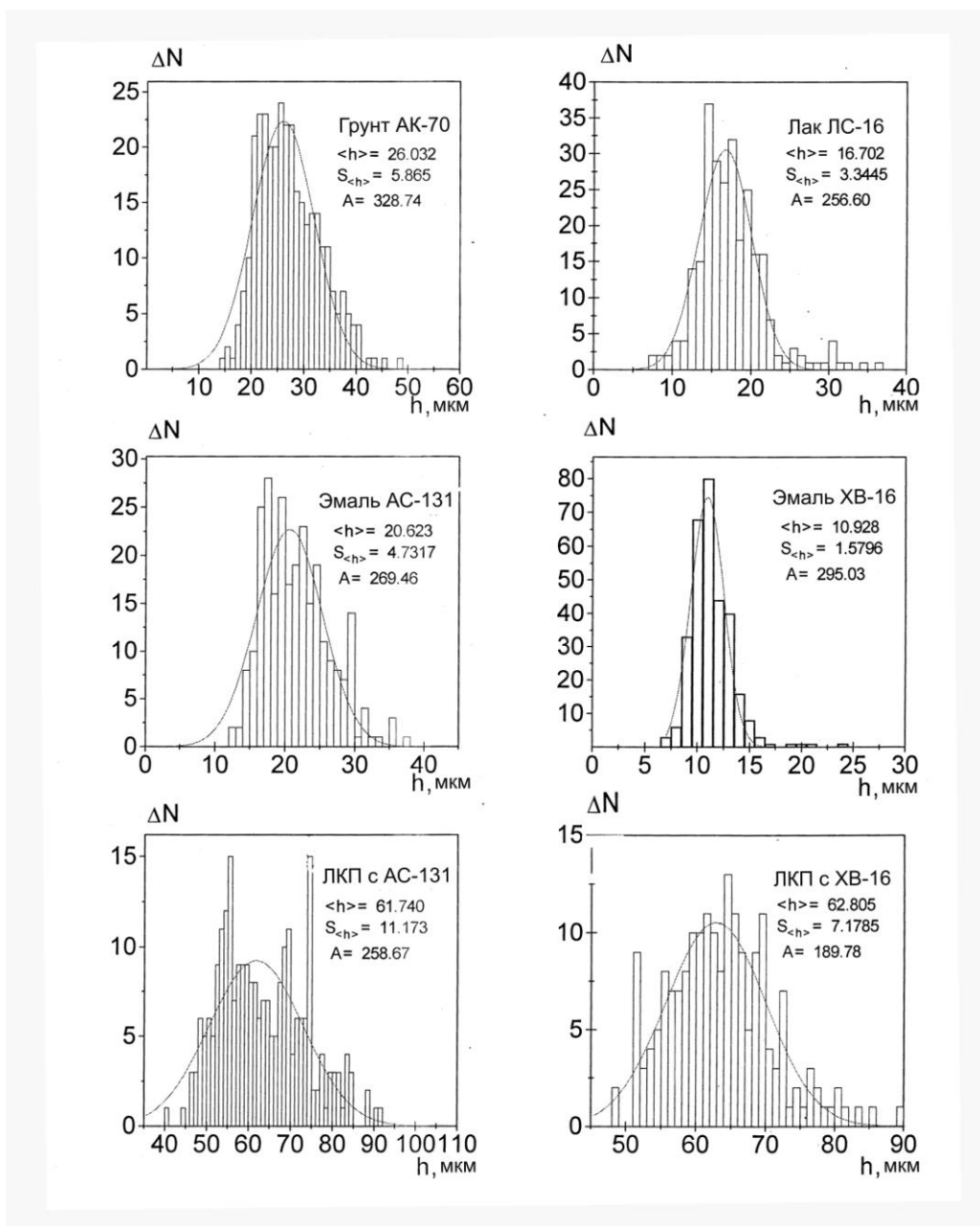


Рисунок 1 – Гистограмма толщины лакокрасочных покрытий и их элементов

Из представленных на рис.1 гистограмм толщины следует, что все слои за исключением эмали ХВ-16 заметно неравномерны по толщине. Графики аналитических зависимостей  $E_b(h)$  для лакокрасочных покрытий и их различных слоев, удовлетворительно аппроксимирующие экспериментальные точки и наложенные на облака этих точек, представлены на рис. 2. Большой разброс значений  $E_b$  для эмали ХВ-16 обусловлен по-видимому ее неоднородностью, что проявляет себя и в технологическом аспекте, приводя к неодинаковой производительности при одинаковых режимах обработки.

Полученные результаты (рис.2) отражают электрическую прочность лакокрасочных покрытий, что позволяет оценить метрическую напряженность поля, необходимого для развития пробоя.

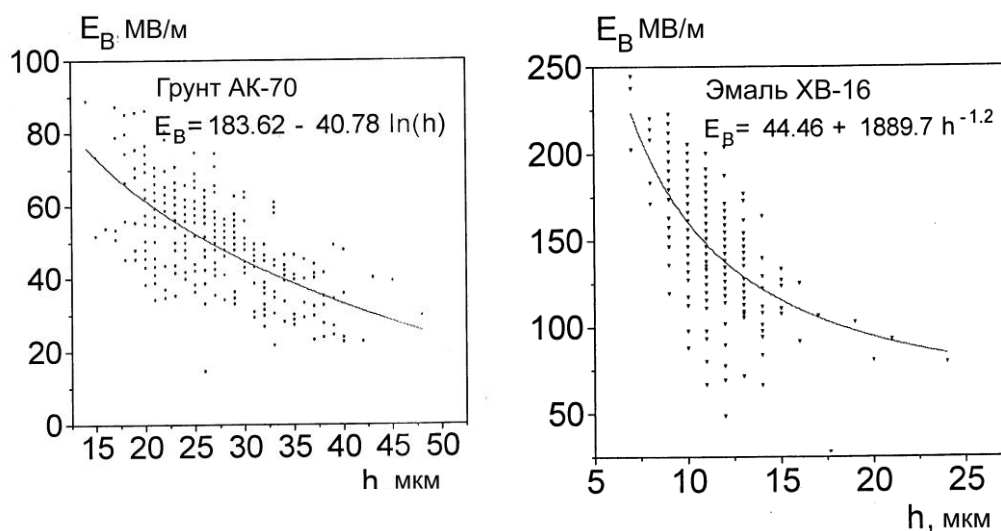


Рисунок 2 – Зависимость электрической прочности лакокрасочных покрытий и их элементов от толщины

#### *Перспективы дальнейших исследований.*

Планируется провести следующие эксперименты:

1. Раздельное определение величин плотности зарядов, возникающих на сферах в результате трибоэлектрического эффекта и их деформации, в процессе моделирования этих процессов на отдельных сферах и плоских образцах полимера, из которого изготавливают рабочие сферы.

2. Интегральное определение заряда сфер до и после их соударения с поверхностью обрабатываемой детали в реально работающей установке с помощью цилиндра Фарадея.

3. Экспериментальное моделирование одиночных актов взаимодействия сфер с чистой и покрытой диэлектрическим материалом металлической поверхностью, с целью определения амплитуд и длительности возникающих импульсов тока и напряжения.

4. Оценка тепловыделения в процессе струйной обработки поверхностей потоками полимерных частиц.

**Список литературы:** 1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. –К.:Тэхника, 1989.–277 с. 2. Andziak Janusz, “Eksplot i dozor”, 1980, 9, №10, 24–25 (Польша). 3. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М. “Физматгиз”, 1962. 4. Василенок Ю.И. Защита полимеров от статического электричества. Л. “Химия”, 1975.